FAST 照明口径分析*

李建玲[1,2,3]，彭勃[1,2]，柴晓明[1,2]

（1.中国科学院国家天文台，北京 100101；2.中国科学院 FAST 重点实验室，北京 100101；

3.中国科学院大学，北京 100049））

摘 要：500 m 口径球面射电望远镜在进行观测时，将球形反射面内部照明区域的形状变为 300 m 口径抛物面，实现望远镜的主焦天线功能。望远镜的照明口径（球面变位到抛物面的口径）对望远镜的观测性能起到决定作用。为了望远镜潜在性能提升及后续发展，在 FAST 望远镜照明口径处于 300 m 及大于 300 m 的情况下，通过不同焦距抛物面与基准球面变位距离的计算，进行球面到不同口径抛物面变位的分析，对望远镜增大照明口径的可实现性进行探讨。给出了在 FAST 反射面变位驱动促动器最大运动行程范围内，增大口径抛物面变位时抛物面焦距及焦径比的选取。在驱动行程方面初步说明了变位的理论可行性。相关分析同样适用于其他口径的抛物面。

关键词：500 m 口径球面射电望远镜；主动反射面；照明口径；变位距离

中图分类号： TH751;　　文献标志码：A　　文章编号：

0 引言

作为世界上最大的单口径射电望远镜，500 m 口径球面射电望远镜（FAST）由于巨大的反射面，使得其观测灵敏度在所有现有的射电望远镜中居首位。反射面是望远镜关键组成部分之一, FAST 望远镜反射面的基准态是一个半径 300 m，直径方向开口口径 500 m 的巨型球冠[1-2]。整个反射面依地势建造在我国贵州喀斯特洼地中。FAST 望远镜主要的技术创新之一是应用主动反射面技术，使其在观测时，球面反射面内被馈源照明区域的形状通过主动控制变化为 300 m 口径的抛物面[3]，抛物面天线将接收到的来自天体的射电波汇聚到抛物面焦点处，再馈送给馈源及接收机进行后续处理。被馈源照明区域的抛物面在球冠反射面内部移动，馈源支撑系统承载并驱动馈源在工作空间内运动[4]，实现对不同位置天体的观测和对某一固定天体的跟踪观测等。FAST 望远镜于 2020 年 1 月正式开放运行。FAST 望远镜主动反射面结构如图 1 所示[5]。

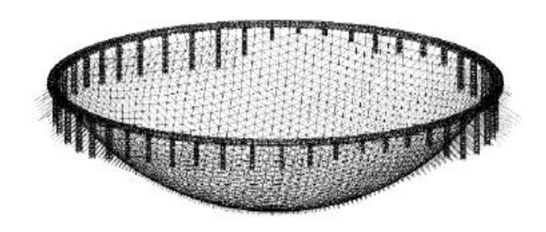


图 1 FAST 望远镜主动反射面结构图

Fig.1 The structure diagram of the active reflector of FAST

*基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFA0404703）；国家自然科学基金青年科学基金项目（11703048）
收稿日期： 修订日期：
作者简介：李建玲，女，工程师. 研究方向：射电天文技术与方法. Email: jlli@nao.cas.cn

FAST 望远镜主动反射面系统主要由圈梁、索网、反射面单元、下拉索、促动器等组成[6]。对反射面起支撑作用的索网主要由主索单元和主索节点组成，反射面单元面板与主索节点连接，铺设在索网上，每个主索节点通过一根下拉索与地面促动器相连。促动器与地锚点相连[7]。促动器是反射面变位的驱动设备，通过控制促动器活塞杆的长度，调节主索节点在索网面上的相对位置，实现索网变位，进而实现索网之上反射面位形的变化。FAST 主动反射面系统中，索网的主索节点为 2225 个，与之相连接的促动器共 2225 台。FAST 望远镜主动反射面系统主要部件和设备示意如图 2 所示。

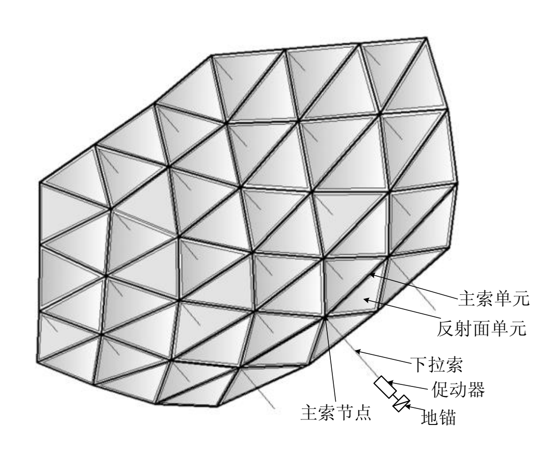


图 2 FAST 望远镜主动反射面系统主要部件和设备示意

Fig.2 Main component of the active reflector system of FAST

对于 FAST 望远镜反射面而言，观测中，被馈源照明区域内的反射面离开球面位置形成抛物面，由于照明区域是移动的，不同位置反射面的形状会在球面和抛物面之间变换。抛物面天线的口径对进一步提高望远镜的观测性能起到决定作用，因此，面向 FAST 望远镜后续发展、观测性能拓展及提升，在 FAST 现有驱动设备（促动器）的运行状态下，探索其增大口径抛物面的变位具有实际意义。

1 基准球面到抛物面的距离分析

FAST 望远镜反射面的形状在球面和抛物面之间变换，基准球面到抛物面的距离分析是进行望远镜反射面变位的基础。FAST 望远镜变位抛物面与基准球面示意如图 3 所示。

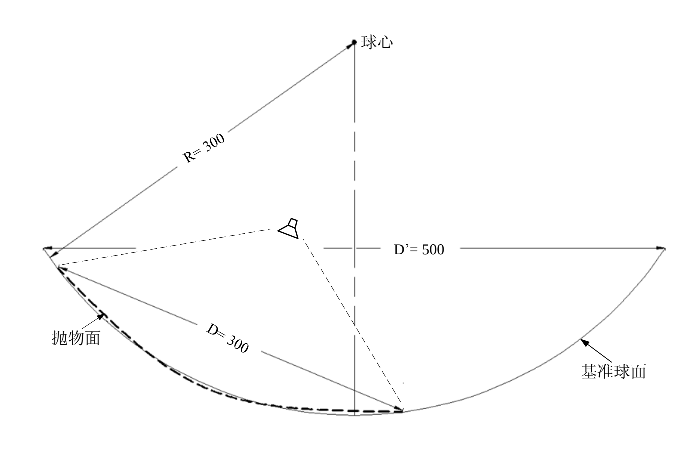


图 3　变位抛物面与基准球面示意图

Fig.3　Paraboloid and spherical surface

由于球面与抛物面的对称性，变位形成的抛物面在球面内部移动，处于球面内不同区域的抛物面与球面的相对关系保持不变。图 3 中，实线表示基准球面，虚线表示由球面变位形成的抛物面。由于抛物面与球面的旋转对称性，变位中抛物面与球面的相关计算可在一维的情况下进行。以球心为坐标原点，球面与抛物面的方程一般可表示如下[8]：

$$\begin{cases} x^2+y^2=R^2 \\ x^2=2py+c \end{cases} \tag{1}$$

如图 3 所示，FAST 望远镜球面反射面基准态为：球面半径 $R=300$ m、球面开口口径 $D'=500$ m。从球面变位得到的抛物面口径 $D=300$ m，即 FAST 望远镜的有效照明口径为 300 m。另外，FAST 望远镜有效照明区域是抛物面形状，观测天体发出的平行于抛物面轴线的射电波汇聚于抛物面焦点处形成完整的点像，即是一个主焦系统。可计算得出抛物面的焦距及焦径比，焦径比 F 可表示为[9]：

$$F=\frac{f}{D} \tag{2}$$

式中 f 为焦点离抛物面反射面的焦距，D 为抛物面的口径。在 300 m 口径抛物面范围内，可计算出不同焦距对应抛物面偏离基准球面的情况，如图 4 所示。

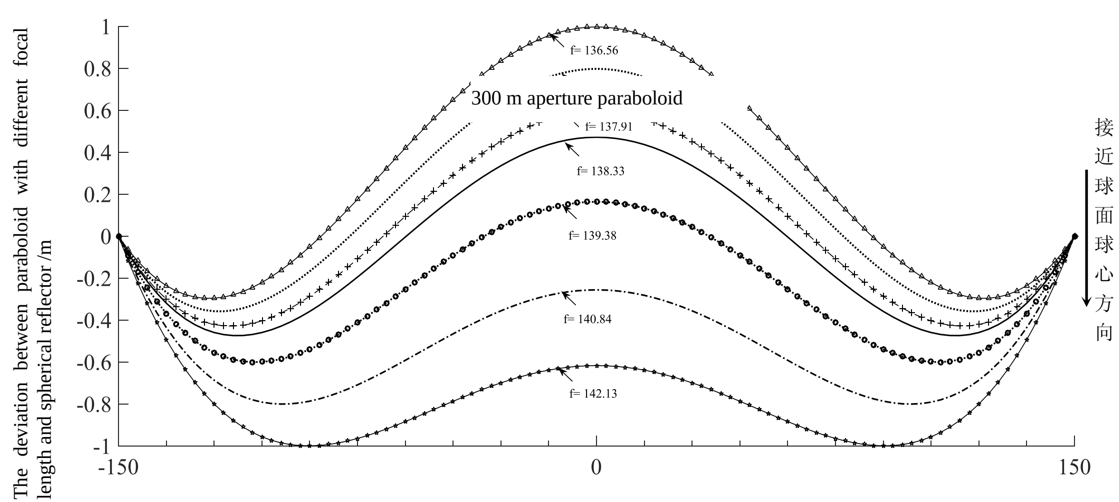


图 4　300 m 口径抛物面时不同焦距抛物面与基准球面的偏离情况

Fig.4　The deviation between paraboloid and spherical reflector

图 4 中，横坐标表示 300 m 口径抛物面的范围，在 136.56-142.13 之间（包含这两个值），选取了 7 个不同焦距，纵坐标表示这 7 个焦距对应抛物面与基准球面的偏离情况。

FAST 望远镜被馈源照明区域的反射面偏离球面形成抛物面，偏离球面意味着小于球面位置或大于球面位置。图 4 可得出，每一个不同焦距的抛物面，存在一个偏离基准球面的最大值，这实际上反映了反射面从基准球面到抛物面的最大变位行程。在 FAST 望远镜变位系统中，促动器的最大行程约为±0.6 m[5, 10]。对照图 3，是以基准球面位置为初始，接近球面球心方向（小于基准球面）及离开球面球心方向（大于基准球面）的最大行程都约为0.6 m。如图 4，得出小于基准球面或大于基准球面的偏离距离值，已减去球面的初始值。如果以离开基准球面球心的方向为正值，则这一方向的最大行程约为 +0.6 m ，而接近球心方向的最大行程约为 -0.6 m。图 4 分别给出了抛物面与球面最大偏离约为±1.0 m、±0.8 m、±0.6 m 及在两个方向上最大偏离基本相同时对应抛物面的偏离情况。

对于口径 300 m 的抛物面，在抛物面焦距约为 138.33 m 时，可得抛物面在以上所述两个方向上偏离基准球面的最大行程基本相同（如图 4）。在一定精度下计算，当抛物面焦距大于此值时，接近基准球面球心方向的行程较大，而抛物面焦距小于此值时，离开基准球面球心方向的行程较大。从图 4 可得出，抛物面口径一定时，随着抛物面焦距的减小，抛物面的整体位形向着离开基准球面球心的方向移动。当抛物面的口径一定时，存在一个抛物面焦距，其对应抛物面在接近球心方向上偏离球面的最大行程约为 0.6 m；同时存在另一个焦距，其对应抛物面在离开球心方向上偏离球面的最大行程也约为 0.6 m。在这两个焦距之间，对应抛物面与球面的偏离距离在±0.6 m 内。

我们可通过计算得出处于 FAST 望远镜驱动促动器最大行程范围内，变位抛物面的焦距及焦径比。计算求得抛物面口径 300 m 时，现有促动器最大行程范围内，两焦距对应抛物面与基准球面的偏离如图 4 所示。通过以上分析，抛物面的焦距在一定范围内时，抛物面偏离球面的距离也在一定范围内，也就是从球面到抛物面的变位行程在一定范围内。

图 4 中横坐标表示 300 m 口径抛物面的范围，纵坐标表示不同焦距时抛物面与球面的偏离，可看出，其中焦距 f=137.91 m，较小焦距对应抛物面在离开球面球心方向最大偏离约为 0.6 m；焦距 f=139.38 m，较大焦距对应抛物面在接近球面球心方向最大偏离也约为 0.6 m。故处于这两焦距之间抛物面偏离球面的距离在±0.6 m 之内。进而由图 4 可求出在这两焦距之间，对应抛物面偏离基准球面最大距离，如图 5 所示。

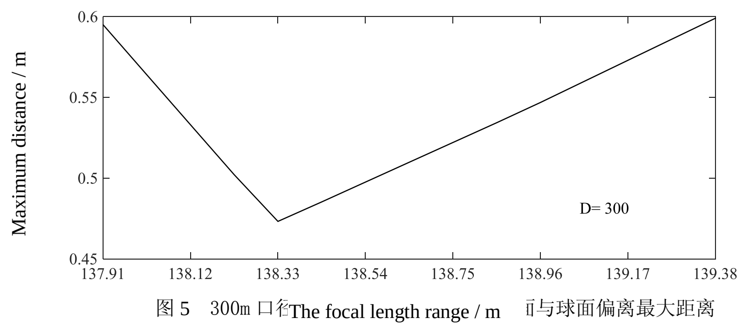


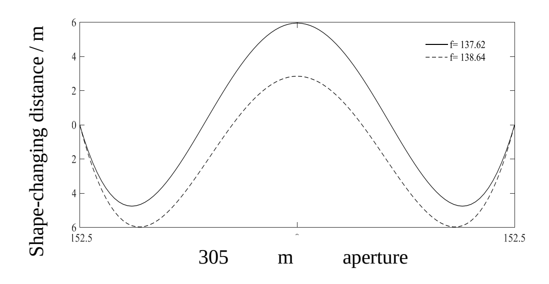
图 5　300m 口[illegible]面与球面偏离最大距离

Fig.5　Maximum distance between paraboloid and spherical reflector in the travel distance of the actuator

图 5 中横坐标表示图 4 中计算的两焦距范围，纵坐标表示焦距对应抛物面与球面偏离最大距离。为了表示距离的限制，图中抛物面接近基准球面球心方向和离开基准球面球心方向的距离都表示为正向。图 5 中得出，随着抛物面焦距的增加，偏差最大距离减小到一定值后再增加，对照图 4 中两焦距，焦距为小值时，抛物面在离开球面球心方向上的最大距离占主导，随着焦距的增加，在离开球面球心方向上的最大距离逐渐减小，直到两个方向上的最大距离基本相同；焦距继续增加，换作抛物面在接近球面球心方向上的最大距离占主导，且随着焦距进一步增加，接近球面球心方向上的最大距离也逐步增加，直到限制值。符合图 4 中抛物面焦距增加引起两者偏离最大距离的变化过程。

2 大于 300 m 口径抛物面的分析

对大于 300 m 口径的抛物面，本文选取 305 m 和 310 m 进行计算分析。对于 305 m 口径抛物面，FAST 望远镜现有促动器最大行程范围内，两焦距对应抛物面与基准球面的偏离如图 6(a)所示。可以求出在这两焦距之间，对应抛物面偏离基准球面最大距离，如图 6(b)所示。



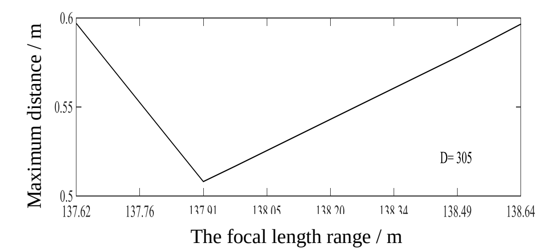


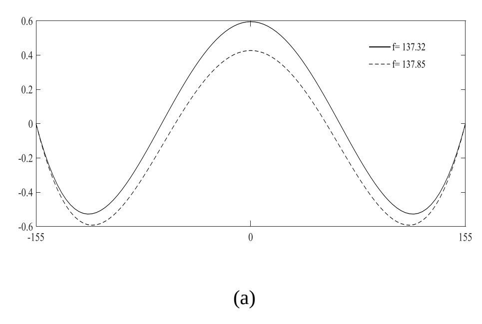
图 6 (a)305m 口径抛物面促动器行程内抛物面与球面偏离距离 b）305m 口径抛物面促动器行程内抛物面与球面偏离最大距离

Fig.6 (a) The shape-changing distance between paraboloid and spherical reflector in the travel distance of the actuator

(b) Maximum distance between paraboloid and spherical reflector in the travel distance of the actuator

图 6(a)中横坐标表示 305 m 口径抛物面的范围，纵坐标表示不同焦距对应抛物面与球面的偏离距离。图中实线和虚线分别表示焦距 f=137.62 m 和 f=138.64 m 对应抛物面与球面的偏离。图 6(b)中，在图 6(a)所示两焦距之间，随着焦距的增加，抛物面与球面偏离最大距离同样呈现从离开球心的最大距离到接近球心的最大距离的变化。

对于 310 m 口径抛物面，FAST 望远镜现有促动器最大行程范围内，两焦距对应抛物面与基准球面的偏离如图 7(a)所示。同样可求出在这两焦距之间，对应抛物面偏离球面最大距离，如图 7(b)所示。



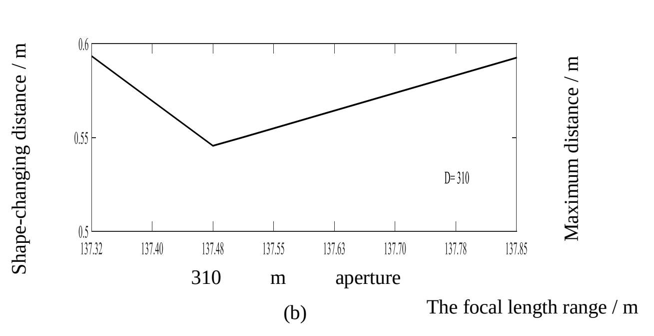


图 7 (a)310m 口径抛物面促动器行程内抛物面与球面偏离距离 （b）310m 口径抛物面促动器行程内抛物面与球面偏离最大距离

Fig.7 (a) The shape-changing distance between paraboloid and spherical reflector in the travel distance of the actuator

(b) Maximum distance between paraboloid and spherical reflector in the travel distance of the actuator

图7(a)中实线和虚线分别表示焦距 f=137.32 m和焦距 f=137.85 m对应抛物面与球面的偏离。同样，图 7(b)中，在这两焦距之间，随着焦距的增加，抛物面与球面偏离最大距离的变化规律同样是先减小再增加。

3 讨论

通过以上计算与分析，从驱动促动器运动行程考虑，增大照明口径到 310 m 理论可行，且对应的焦距与焦径比可在一定范围内选取。另外，照明口径增大时，望远镜馈源定位与馈源照明等需要与抛物面相应匹配。FAST 望远镜馈源支撑系统的 6 索驱动机构及 AB 轴机构等可实现馈源的控制定位。与 300 m 口径相比，照明口径在 310 m 左右时，馈源运动位置、馈源照明变化都较小，与馈源系统相关的部件设备等易于实现相应匹配。FAST 望远镜反射面变位时，目前促动器最大速度约为 1.6 mm/s[6]。如果变位调整量为 0.6 m，在此速度下，可知变位所需时长约 7 min 左右。

总结上述计算数据，表 1 列出了 FAST 望远镜反射面变位中，分别对于 300 m、305 m 及 310 m 口径抛物面，在现有驱动促动器最大行程范围内， 计算得出的抛物面焦距及焦径比的近似取值。

表 1　促动器行程范围内不同口径抛物面对应主要参数取值

Table.1　The main parameter of paraboloid of different apertures in the travel distance of the actuator

Aperture of the paraboloid / m	Focal length of the paraboloid / m	Focal ratio （F）
300	137.91-139.38	0.460-0.464
305	137.62-138.64	0.452-0.454
310	137.32-137.85	0.443-0.444

4 结 语

抛物面口径及基准球面尺寸为定值时，基于文中的抛物面与球面基本关系，通过计算抛物面偏离球面情况得出，随着抛物面焦距的减小，抛物面整体位形向着离开基准球面球心的方向移动。在 FAST 望远镜驱动促动器最大行程范围限制下，进行从球面到不同口径抛物面的变位，大口径抛物面对应可选取的焦距范围较小，而小口径抛物面对应可选取的焦距范围较大。从 FAST 望远镜驱动促动器运动行程的方面考虑，给出了 305 m 和 310 m 口径抛物面焦距与焦径比的取值，还需考虑对望远镜索网及下拉索等的具体影响。抛物面与基准球面的计算同样适用于其他口径抛物面的情况。

参考文献：

[1] NAN R D, PENG B, ZHU W B, et al. The FAST Project in China[C]. ASP Conference Series, eds. G. Lemarchand, K. Meech , 2000, 213, 523-528.

[2] NAN R D, REN G X, ZHU W B, et al. Adaptive Cable-mesh Reflector for the FAST[J]. ACTA ASTRONOMICA SINICA, 2003,44(Suppl.):13-18.

[3] PENG B, NAN R D, SU Y. Proposed world’s largest single dish, FAST[J]. Proc. of SPIE 4015, Radio Telescopes, 2000, 45-54.

[4] 张新宇,李辉, 杨世模. FAST 望远镜两轴转向机构结构方案优化[J]. 天文研究与技术，2011, 8(3)：220-228. ZHANG X Y, LI H, YANG S M. Optimal Designs of the Structure Configuration of the Two-Axis Steering Mechanism of the FAST[J]. Astronomical Research & Technology, 2011, 8(3)：220-228.

[5] 朱忠义，刘飞，张琳，等. 500 m 口径球面射电望远镜反射面主体支承结构设计[J]. 空间结构, 2017,23(2):3-8.
ZHU Z Y, LIU F, ZHANG L, et al. Primary supporting structure design of Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST)[J]. Spatial Structures, 2017,23(2): 3-8.
[6] 王启明，高原，薛建兴，等. 500 m 口径球面射电望远镜反射面液压促动器关键性能分析[J]. 机械工程学报, 2017，53(2):183-191.
WANG Q M, GAO Y, XUE J X, et al. Key Performance Analysis of Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope Reflective Surface Hydraulic Actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 183-191.
[7] 孔旭，姜鹏，王启明. FAST 主动反射面索网结构参数变化对索力的影响分析[J]. 天文研究与技术, 2015,12(2):159-165.
KONG X, JIANG P, WANG Q M. A Study of Influences of Value Variations of Structural Parameters on Forces in Cables in the Net Structure of Cables of the FAST[J]. Astronomical Research & Technology, 2015, 12(2):159-165.
[8] 孔旭，姜鹏，王启明. FAST 索网高应力幅变位疲劳问题的优化分析[J]. 工程力学, 2013,30(Suppl):169-174.
KONG X, JIANG P, WANG Q M. Investigation on Fatigue Life of FAST Cable-net under High Stress Amplitude Produced by Long-time Active[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(Suppl): 169-174.
[9] 胡企千，姚正秋编著. 天文望远镜设计[M]. 中国科学技术出版社，北京，2013.
[10] 李庆伟，姜鹏，南仁东. FAST 反射面面板单元初始间隙[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 4-9.
LI Q W, JIANG P, NAN R D. Initial Gap between Panels of the Reflector of FAST[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017,53(17):4-9.

Re-investigation of the Illuminated Aperture of the FAST

Li Jianling[1,2,3], Peng Bo[1,2], Chai Xiaoming[1,2]

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) can change the shape of its illuminated area of the spherical reflector into a paraboloid of 300 m aperture, which realized the primary reflector antenna function of the telescope. The illuminated aperture of the telescope (the aperture of the paraboloid that changed from the spherical reflector) plays key role in the performance of the telescope. In order to improve potentially the performance and for the subsequent development of the telescope, when the illuminated aperture of FAST is 300 m and larger than 300 m, through the calculation of the shape-changing between paraboloid with different focal lengths and the reference spherical reflector, the analysis of the shape-changing from the spherical reflector to the paraboloid is carried out, and the realization of the other illuminated aperture for the telescope is discussed. The focal length and the focal ratio of the paraboloid in the maximum movement distance of the actuator are given. In terms of the driving distance, the theoretical feasibility of the shape-changing is explored. The analysis is also

applicable to the paraboloid of other apertures.

Key words: FAST; Active reflector; Illuminated aperture; Shape-changing distance